第 29 卷 第 1 期 材 料 研 究 学 报 Vol. 29 No. 1
2015 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH January 2015

常压空气等离子体对连续纤维的在线改性*

贾彩霞[1] 陈 平[1,2] 王 乾[2] 王 静[1] 任 荣[1]

1. 沈阳航空航天大学 辽宁省先进聚合物基复合材料制备技术重点实验室 沈阳 110136
2. 大连理工大学化工学院 三束材料改性教育部重点实验室 大连 116024

摘 要 采用常压空气介质阻挡放电(DBD)等离子体技术, 分别对PBO、Armos和Twaron 3种高性能连续纤维进行了在线改性处理。使用X-射线光电子能谱(XPS)、扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)、单丝拉伸强度(SFTS)和层间剪切强度(ILSS)等手段对比分析了纤维化学组成、物理形貌与粗糙度、拉伸性能以及纤维增强复合材料界面粘结性能的变化。结果表明: DBD改性后3种纤维表面的氧、氮元素含量以及粗糙程度均增加, 其增强的复合材料ILSS分别提高了18.6%, 10.2%和24.8%。但是3种纤维的表面氧、氮含量增加程度以及受刻蚀程度却有显著的差异。这可能与纤维的分子构成和耐热性能有一定的关系, 综合影响了DBD对复合材料界面粘结性能的改善。同时, 在纤维表面及其复合材料界面性能明显改善的等离子体处理条件下, 纤维的SFTS没有明显的下降。

关键词 有机高分子材料, 在线改性, 常压空气等离子体, 表面, 界面

分类号 TB324 文章编号 1005-3093(2015)01-0010-07

On-line Modification of Continuous Fibers by Atmospheric Air Plasma

JIA Caixia[1] CHEN Ping[1,2**] WANG Qian[2] WANG Jing[1] REN Rong[1]

1. Liaoning Key Laboratory of Advanced Polymer Matrix Composites Manufacturing Technology, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2. Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams (Ministry of Education) & School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

*Supported by National Defense 12th 5-year Basic Scientific Research Program of China No. A352×××××××, National Natural Science Foundation of China No.51303106, General Scientific Research Program of Liaoning Education Department No.L2014056, and Doctor Start-up Funds of Shenyang Aerospace University No.13YB05.

Manuscript received March 26, 2014; in revised form November 26, 2014.

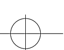
**To whom correspondence should be addressed, Tel: (024)89723970, E-mail: chenping_898@126.com.

ABSTRACT Three high-performance continuous fibers PBO, Armos and Twaron were on-line modified by atmospheric air dielectric barrier discharge (DBD) plasma. Then the modified fibers were characterized by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM), measurements of single fiber tensile strength (SFTS) and interlaminar shear strength (ILSS) in terms of their surface chemical composition, morphology, roughness and tensile strength, as well as interfacial adhesion properties of fiber reinforced composites respectively. Results showed that the oxygen and nitrogen content, and the roughness of fiber surface after DBD plasma modification with PBO, Armos and Twaron were all increased, and the ILSS of their composites were enhanced by 18.6%, 10.2% and 24.8%, respectively. However, it is important to note that there were significant differences in the increment of oxygen and nitrogen content as well as the etching effect of the surface for the three modified fibers, which might be related to the difference of their molecular structures and thermal performances. Apparently, the atmospheric air dielectric barrier discharge (DBD) plasma treatment is proved to be an effective means to improve the surface performance of the fibers while no harm to their SFTS and thereby the ILSS of the composite composed of a resin with the three fibers may obviously be enhanced.

* 国防"十二五"基础科研项目A352×××××××, 国家自然科学基金51303106, 辽宁省教育厅科学研究一般项目L2014056和沈阳航空航天大学博士启动基金13YB05资助。

2014年3月26日收到初稿; 2014年11月26日收到修改稿。

本文联系人: 陈 平, 教授



KEY WORDS organic polymer materials, on-line modification, atmospheric air plasma, surface, interface

日本Toyobo公司生产的PBO纤维、俄罗斯“Tverchimovolokno” J.-S.公司生产的Armos纤维以及荷兰Akzo Nobel公司生产的Twaron纤维均属于高性能有机纤维, 因其自身结构的特殊性而具有较高的比强度、比模量、优异的抗蠕变性、化学稳定性以及耐热性, 是先进聚合物基复合材料理想的增强材料, 在航空、航天、武器装备等国防领域有广泛的应用前景[1-5]。但是, 这些有机纤维的分子链结晶度高、分子链高度取向, 致使纤维表面光滑平整、缺少极性基团, 呈化学惰性, 使其与树脂基体之间不能形成良好的化学键合以及物理锚合作用, 进而导致界面粘结性能较差, 最终影响纤维增强树脂基复合材料的整体性能。因此, 选择合适的手段对纤维表面进行改性以提高纤维与树脂基体之间的粘结强度, 是十分必要的[6, 7]。

近年来高效节能、环境友好的低温等离子体技术迅速发展, 由于其产生条件不受限制、适于处理不同几何形状的样品、可选用不同的处理气氛等优势, 成为目前较为常用的一种纤维表面改性手段[8-11]。低温等离子体可在低压或常压条件下产生, 但是低气压下产生的等离子体通常需要昂贵的真空系统, 成本高且不适宜连续化操作。因此, 大气压低温等离子体的产生和应用受到了越来越多的关注。一种能在大气压条件下利用空气气氛产生稳定低温等离子体的放电方式——介质阻挡放电(DBD), 无需真空系统, 不受封闭放电空间的限制, 方便处理任何尺寸的试样, 成本低, 效率高以及可连续作业, 非常适合大规模工业化生产, 已广泛应用于连续纤维的表面改性[12-16]。

本文选用常压空气DBD等离子体对PBO、Armos和Twaron 3种商业化高性能连续纤维进行了在线改性处理, 对比分析等离子体处理前后3种纤维化学组成、物理形貌、拉伸强度以及纤维增强复合材料界面粘结性能的变化了, 并探讨DBD对3种纤维改性效果的差异。

1 实验方法

1.1 实验用材料

3种实验用高性能连续纤维分别为: PBO纤维、Armos纤维和Twaron纤维, 其结构和性能列于表1。树脂基体选用含二氮杂萘酮联苯结构的聚芳醚砜酮(PPESK)热塑性树脂; 丙酮(沸点56℃), N, N-二甲基乙酰胺(DMAc, 沸点165℃)。

1.2 试样的制备

图1给出了介质阻挡放电(DBD)等离子体处理及连续纤维增强复合材料的制备流程示意图。接通高压交流电时上下两电极之间的区域产生宏观上均匀稳定的丝状放电, 用丙酮清洗后的纤维经过此放电间隙接受等离子体处理, 再连续通过盛有PPESK/DMAc树脂胶液的浸胶槽, 经刮胶、缠绕、烘干形成单向预浸料, 最后用高温模压工艺制备复合材料单向板[17]。由于整个过程等离子体装置保持与大气连通, 适合连续作业, 可称为常压空气DBD等离子体在线改性, 其详细的技术工艺参数设置列于表2。

1.3 性能的表征

采用ESCALAB 250X射线光电子能谱仪(XPS)分析纤维表面的化学组成。测试采用Al单阳极X射线源, 单色化Al$K_α$($hν$=1486.6 eV), 分析室中的真空度优于$3.0×10^{-10}$ kPa, 激发电压和功率分别为15 kV和150 W。C、O、N元素定量分析采用的扫描通能和

表1 PBO, Armos和Twaron纤维的结构与性能

Table 1 Structure and properties of PBO, Armos and Twaron fibers

Fiber sample	Chemical structure	Diameter /m	Density /kg/m³	Long-term working temperature /K	Thermal decomposition temperature /K
PBO	[structure]	$1.2×10^{-5}$	$1.56×10^{3}$	573	923-973
Armos	[structure]	$1.5×10^{-5}$	$1.45×10^{3}$	473	823-873
Twaron	[structure]	$1.2×10^{-5}$	$1.44×10^{3}$	453	753-833

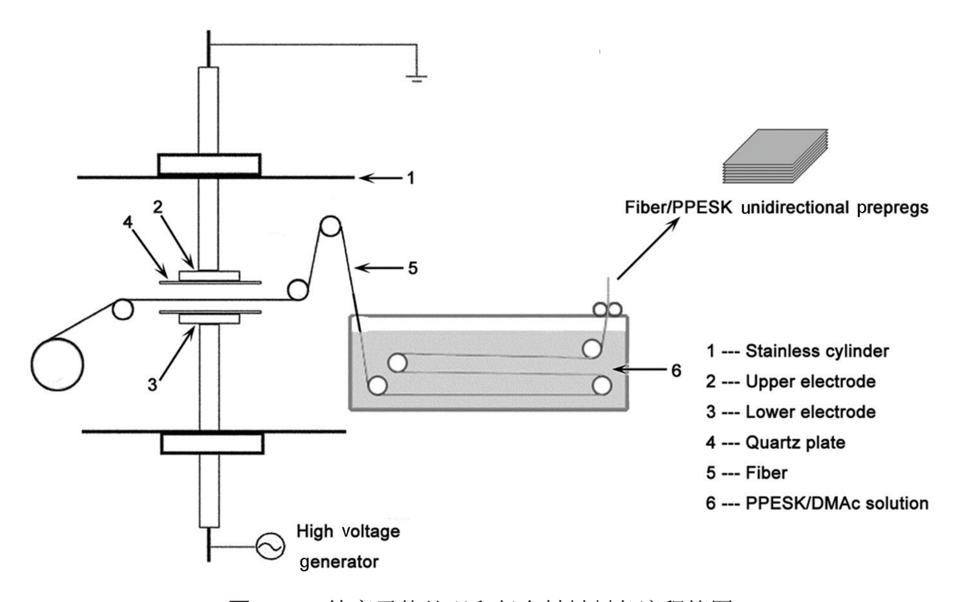


图1 DBD等离子体处理和复合材料制备流程简图
Fig.1 Schematic representation of DBD plasma treatment and composite preparation

表2 DBD等离子体处理工艺参数
Table 2 Parameters of DBD plasma treatment

Electrode diameter /m	Discharge gap /m	Dielectric thickness /m	Output Power /W	Time /s	Pressure /Pa	Output frequency /Hz
4.7×10^{-2}	0.3×10^{-2}	0.1×10^{-2}	150	10	1.013×10^{5}	2.7×10^{4}

步长分别为100 eV和1 eV。

采用QUANTA 200扫描电子显微镜(SEM)观察纤维的表面形貌。扫描环境为60 Pa低真空, 加速电压25 kV。

采用PicoScan™ 2500原子力显微镜(AFM)测量纤维表面的粗糙度。用轻敲模式对纤维表面进行扫描(Si探针的弹性系数为42 N/m, 共振频率300 kHz, 尖端曲率半径<10^{-9} m), 使用AFM软件PicoScan5计算纤维表面的均方根粗糙度R_q及算术平均粗糙度R_a。

按照ASTM D 2344标准采用三点式短梁弯曲法, 在RG 3050型万能试验机上测试纤维/PPESK复合材料的层间剪切强度(ILSS), 温度与相对湿度条件分别为20℃和50%, 试样尺寸25 mm×6 mm×2 mm, 跨度厚度比为5∶1, 十字压头加载速率为2 mm/min, 每组测5个试样取平均值。

采用INSTRON 5567A万能材料试验机测量单丝纤维拉伸强度(SFTS), 分析纤维在等离子体改性前后拉伸性能的变化。按照标准ASTM D3379-75, 将每一根纤维单丝用胶粘剂牢牢固定在一个纸片卡框之上, 在室温条件下使用100 N的传感器测试, 试样计量长度为25 mm, 拉伸速率1.0 mm/min, 每组测10个试样取其平均值。

2 结果和讨论

2.1 纤维表面的元素含量的变化

常压空气DBD等离子体工艺参数的变化影响PBO、Armos和Twaron 3种连续纤维表面化学性能[18-20]: 例如, 在处理时间(10 s)相同的条件下, PBO纤维表面氧元素含量随着放电功率的逐渐增大呈现先增长后降低的现象, 当功率约为225 W时达到最大值, 此时氮元素含量也有明显的提高; 而在放电功率相同的条件下, Armos纤维和Twaron纤维的表面氧、氮元素含量随处理时间的延长也分别具有非常明显的变化规律。本文选择一个相对适中的放电功率及处理时间参数, 分别对3种纤维进行表面改性, 并对比分析了在相同处理条件下纤维表面的化学性能变化。

图2给出了在150 W, 10 s条件下经常压空气DBD等离子体处理前后, PBO、Armos和Twaron 3种连续纤维的表面氧、氮元素含量变化, 其增长率对比如图3所示。由图2可见, 在相同条件的等离子体处理后, 3种纤维表面的氧元素含量均有明显提高, 氮元素含量也呈现增多现象。但是经图3对比发现, PBO、Armos和Twaron这3种纤维在DBD等离子体改性前后其表面氧、氮元素含量的增长率存有明显差异, 具体为: PBO纤维表面的氧、氮元素增长率最

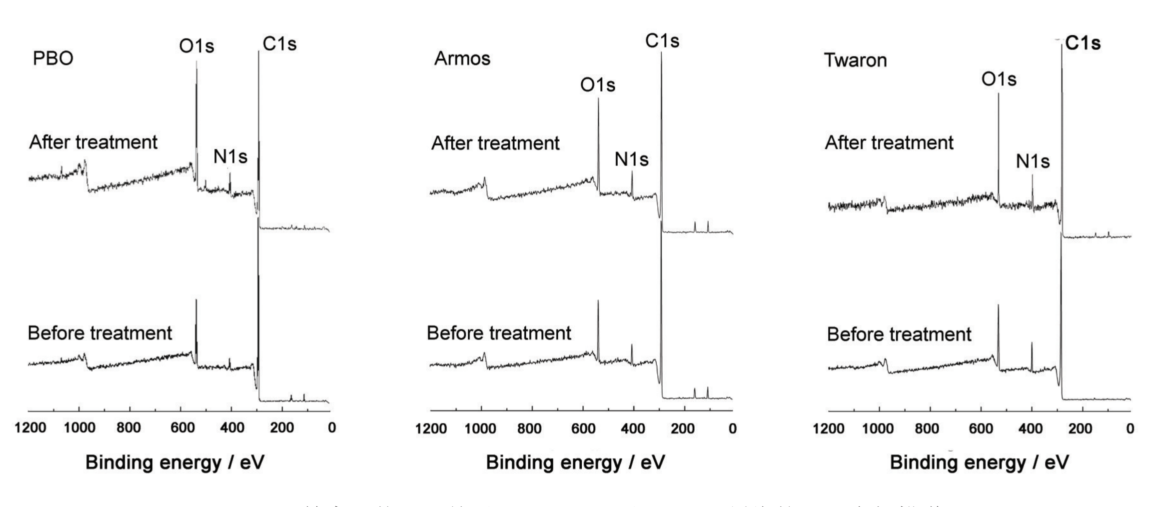


图2 DBD等离子体处理前后PBO、Armos和Twaron纤维的XPS全扫描谱

Fig.2 XPS survey spectra of PBO, Armos and Twaron fibers before and after DBD plasma treatment

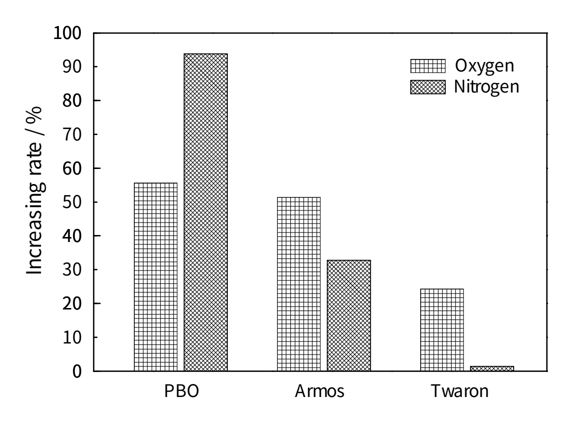


图3 经DBD等离子体处理后PBO、Armos和Twaron纤维的O、N元素增长率对比

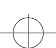
Fig.3 Contrast of O, N increasing rates of PBO, Armos and Twaron fibers after DBD plasma treatment

大, 分别达到55.6%和93.8%; Armos纤维次之, 分别达到51.4%和32.8%; 而Twaron纤维最小, 分别达到24.3%和1.4%。并且, 氮元素含量的增长差异更为显著。

等离子体中活性粒子的能量约为几到几十个电子伏特, 而聚合物中常见化学键如C—H的键能为4.3 eV, C—C的键能为3.4 eV, C—N的键能为2.9 eV, C=C的键能为6.1 eV, C=O的键能为8.0 eV[21]。因此在等离子体活性粒子的能量作用下, 聚合物材料表面便会发生分子键断裂, 进而可以与放电空间所产生的自由基结合而引入新的元素与基团[22, 23]。由表1所列的3种纤维化学结构式可以看出, PBO纤维结构单元中有一个含两个氮原子的苯并二恶唑芳杂环, 而Armos纤维结构单元中有一个含一个氮原子的苯并咪唑芳杂环。在等离子体中电子、亚稳态粒子以及高能射线等的轰击作用下, 纤维表面几个分子层中杂环结构的氮原子似乎更容易发生断键反应[24], 形成含氮的分子碎片进入到等离子体中, 再经过空气等离子体的氧化作用形成含氮和氧的活性自由基, 与最表层分子上所形成的活性点相结合而使纤维表面的氮元素含量增加, 同时也有助于氧元素含量的增长。Twaron纤维分子中无此类芳杂环结构, 因此只涉及到放电空间所产生的含氧自由基在纤维表面的引入使氧元素含量有所增加, 而氮元素的含量几乎保持不变。由此可见, 纤维本身的分子构成影响等离子体对纤维表面化学组成的改性效果。

2.2 纤维表面物理形貌的变化

常压空气DBD等离子体中存在各种活性粒子以及高能射线(如紫外光), 作用于纤维表面其实是一个能量转移的过程。经过处理的纤维表面除通过与放电空间所产生的含氧、含氮自由基相结合而使氧、氮元素含量增加以外, 也发生降解、交联等反应, 进而使表面产生粗化现象[22]。同样地, 常压空气DBD等离子体工艺参数的变化对PBO、Armos和Twaron 3种连续纤维表面物理性能的影响在之前的研究中均有涉及[18-20], 3种纤维呈现出相同的变化规律: 在处理时间相同的条件下, 纤维表面粗糙度随着放电功率的逐渐增大而增大; 在放电功率相同的条件下, 纤维表面粗糙度随着处理时间的逐渐延长而增大; 当放电功率过高或处理时间过长时, 纤维表面均受到不同程度的破坏。在此基础上, 本文选择了适中的放电功率及处理时间参数150 W-10 s, 分别对3种纤维进行表面改性, 进一步对比分析了在相同处理条件下纤维表面的物理形貌变化。图4给出了常压空气DBD等离子体处理前后PBO、Armos和Twaron 3种连续纤维的表面物理形貌变化情况。从图4可以看出, 经过同等条件的等离子体处理, 3种纤维表面被刻蚀的程度有所不同。其中Twaron纤维表面出现了沿轴向分布的较深沟槽和明显凸起,



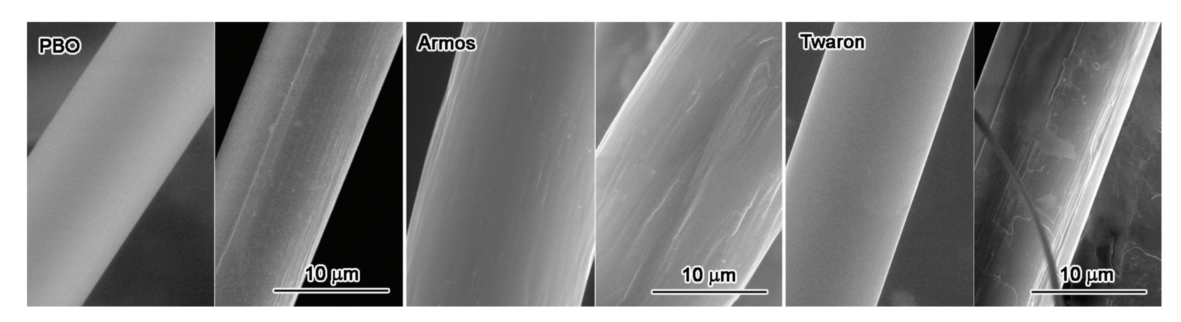


图4 经DBD等离子体处理后PBO、Armos和Twaron纤维的SEM像

Fig.4 SEM images of PBO, Armos and Twaron fibers after DBD plasma treatment

受刻蚀的程度较大; Armos纤维表面原有的浅槽特征结构略有加深和加宽, 出现了大面积的刻蚀痕迹; 而PBO纤维表面只出现了沿轴向分布的浅槽结构[18], 受刻蚀的程度较轻。表3列出了DBD等离子体处理前后3种纤维表面粗糙度的变化, 与SEM所示的结果相符。另外值得注意的是, 3种纤维表面受刻蚀程度的大小(PBO<Armos<Twaron)与其表面氧、氮元素含量增长的多少(PBO>Armos>Twaron)规律完全相反。这表明, 在等离子体作用下纤维表面的化学结构变化与其物理形貌变化并不一致。

上述结果的出现, 可能与纤维本身的耐热性能有关。常压空气DBD等离子体是一种低温等离子体, 亦称为非平衡态等离子体, 虽然离子和分子的温度接近常温(约300-500 K), 但是电子的温度高达10^4 K[25, 26], 对纤维局部产生非常强烈的刻蚀或消融作用, 从而改变其表面形貌。从表2可见, 本文所选的3种纤维中PBO耐热性能最佳, Armos次之, Twaron相对较差, 这与纤维表面所受刻蚀程度一致。

2.3 等离子体处理对纤维增强复合材料界面性能的影响

DBD等离子体改性前后PBO、Armos和Twaron 3种连续纤维增强热塑性PPESK树脂基复合材料的层间剪切强度(ILSS)变化及其增长率对比关系, 如图5所示。结合上述实验结果, 常压空气DBD等离子体处理可改变纤维表面的化学组成与物理形貌, 通过引入活性基团和粗化纤维表面以改善其表面性能[27]。经过常压空气DBD等离子体处理后, 在Twaron纤维表面引入的氧、氮元素含量较少(分别为24.3%和1.4%), 但是受刻蚀的程度最为明显(出现较深沟槽和明显凸起)。纤维表面粗糙度及表面积的增加有利于对树脂基体的浸润和锚合作用, 因此Twaron/PPESK复合材料的ILSS实现大幅增长, 增长率为24.8%; 而经过常压空气DBD等离子体处理后PBO纤维表面受刻蚀的程度较小(只是出现些许浅槽结构), 但是引入的氧、氮元素含量最多(分别为55.6%和93.8%), 纤维表面极性与反应活性的增大, 同样有利于与树脂基体形成氢键与化学键合作用。因此, PBO/PPESK复合材料的ILSS增长也非常明显, 增长率为18.6%。

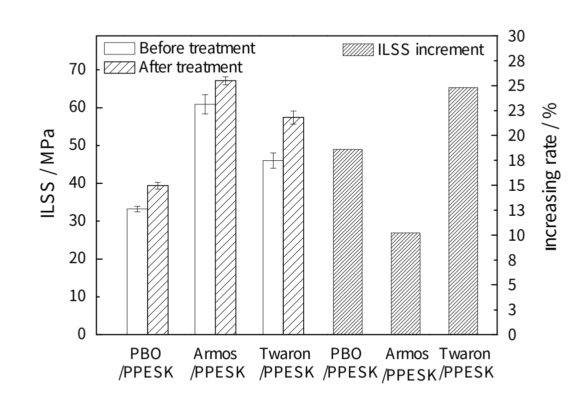


图5 纤维/PPESK复合材料的ILSS和增长率对比

Fig.5 ILSS of fiber/PPESK composites and contrast of ILSS increasing rate

ILSS结果表明, 纤维增强复合材料的界面粘结强度受纤维表面化学组成以及表面物理形貌的共同影响。结合XPS、SEM及AFM测试分析可得, 氧、氮元素在纤维表面的引入量影响了纤维表面极化程度的大小与活性中心的多少, 而纤维表面的粗糙程度影响了纤维表面积的大小及机械锚合点的多少。这是决定纤维增强树脂基复合材料界面性能的两个重要因素。在实验所选的常压空气DBD等离子体处理条件下, PBO、Armos和Twaron 3种连续纤维表面的氧、氮元素增量(图3)及粗糙程度变化(表3)分别受到了不同程度的影响, 因此其复合材料的界面性能出现不同程度的改善; 结合上述数据分析发现, 用表面物理形貌变化较大的Twaron纤维增强PPESK树脂所得复合材料的ILSS实现了相对较大的增长。由此可见, 纤维表面物理形貌的变化在复合材料界面粘结性能的改善中占据了相对主导的地位。

表3 DBD等离子体处理前后纤维表面的粗糙度变化
Table 3 Surface roughness of fibers before and after the DBD plasma treatment

Fiber sample	Before DBD treatment		After DBD treatment	
	R_q/m	R_a/m	R_q/m	R_a/m
PBO	1.88×10^{-7}	2.08×10^{-7}	2.12×10^{-7}	2.32×10^{-7}
Armos	2.18×10^{-7}	2.06×10^{-7}	2.60×10^{-7}	2.44×10^{-7}
Twaron	2.01×10^{-7}	1.89×10^{-7}	2.44×10^{-7}	2.26×10^{-7}

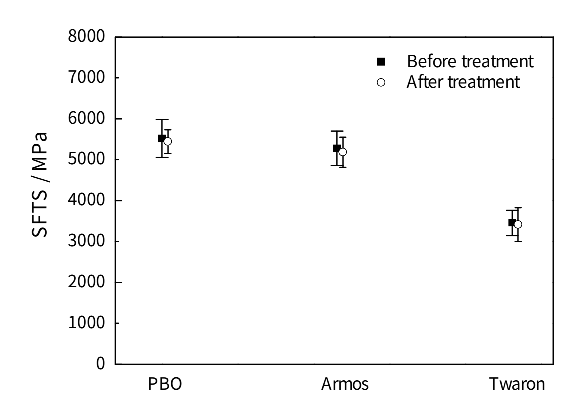


图6 DBD等离子体处理前后纤维/PPESK复合材料的SFTS
Fig.6 SFTS of fiber/PPESK composites before and after DBD plasma treatment

2.4 等离子体处理对纤维拉伸性能的影响

常压空气DBD等离子体处理可以改变纤维表面的化学组成与物理形貌, 通过引入活性基团和粗化物理形貌改善纤维的润湿性、相容性以及界面粘结性等, 然而基于等离子体技术的表面改性也可能对纤维的本体性能产生一定的负面影响。本文作者曾分别研究了常压空气DBD等离子体改性对PBO纤维和Armos纤维拉伸性能的影响[18, 19]: 在相同的处理时间条件下, PBO纤维的单丝拉伸强度随着放电功率的逐渐增大而降低; 在相同的放电功率条件下, Armos纤维的单丝拉伸强度随着处理时间的逐渐延长而降低。

图6给出了经过150 W-10 s的等离子体处理前后PBO、Armos和Twaron 3种纤维的单丝拉伸强度(SFTS)变化。由图6可见, 改性后的3种纤维平均单丝拉伸强度较改性前均有不同程度的降低, 因为空气DBD等离子体中的活性粒子轰击纤维表面引入一些缺陷(图4), 产生了应力集中点[28], 使材料的机械性能受到损伤。但总体上, 3种纤维拉伸性能的下降程度均未超过2%, 所受影响并不显著。3种纤维的SFTS结果表明, 选取适当的常压空气DBD等离子体处理条件, 可在提高纤维表面氧、氮元素含量改善其化学性能、粗化纤维表面形貌改善其物理性能的同时, 基本保持纤维的本体性能; 同时表明, 常压空气DBD等离子体是一种适用于有机纤维表面改性的有效技术手段。

3 结　论

1. 经同等条件的空气等离子体改性后, 尽管3种纤维表面的氧元素和氮元素含量均有明显提高, 但其增长率存有明显的不同, 表明改性效果与纤维表面的化学结构有一定关联。

2. 经同等条件的空气等离子体改性后, 3种纤维表面被刻蚀的程度不同, 而且与表面化学组成的变化大小不一致, 可能与纤维本身的耐热性能有关。

3. 纤维表面性能的改善有利于与树脂基体的粘合, 而纤维增强复合材料界面粘结性能受纤维表面化学组成以及物理形貌的共同影响。在本文实验所选的常压空气DBD等离子体处理条件下, 物理形貌的变化对界面粘结性能的改善占据相对主导地位。

4. 常压空气DBD等离子体中的活性粒子轰击纤维表面引入一些缺陷, 因此改性后纤维的平均单丝拉伸强度较改性前均有所降低。但是在总体上, 3种纤维拉伸性能的下降程度均未超过2%, 所受影响并不明显。

参 考 文 献

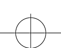
1 T. Kitagawa, K. Yabuki, R.J. Young, An investigation into the relationship between processing, structure and properties for high-modulus PBO fibres. Part 1. Raman band shifts and broadening in tension and compression, Polymer, **42**, 2101(2001)

2 G. M. Wu, Oxygen plasma treatment of high performance fibers for composites, Materials Chemistry and Physics, **85**, 81(2004)

3 HUANG Yudong, PBO super fiber and its surface treatment, Hi-Tech Fiber & Application, **26**(1), 11(2001)
(黄玉东, PBO超级纤维研究进展及其表面处理, 高科技纤维与应用, **26**(1), 11(2001))

4 K. E. Perepelkin, I. V. Andreeva, E. A. Pakshver, I. Y. Morgoeva, Thermal Characteristic of para-aramid fibers, Fibre Chemistry, **35**, 265(2003)

5 Y. H. Zhang, Y. D. Huang, L. Liu, L. N. Wu, Surface modification of aramid fibers with γ- Ray radiation for improving interfacial bonding strength with epoxy resin, Journal of Applied Polymer Science, **106**, 2251(2007)



6 R. J. Day, K. D. Hewson, P. A. Lovell, Surface modification and its effect on the interfacial properties of model aramid- fibre/epoxy composites, Composites Science and Technology, **62**, 153(2002)
7 K. Q. Luo, J. H. Jin, S. L. Yang, G. Li, J. M. Jiang, Improvement of surface wetting properties of poly(p-phenylene benzoxazole) by incorporation of ionic groups, Materials Science and Engineering B, **132**, 59(2006)
8 XIE Linkun, YE Xi, WU Zhangkang, DENG Qiping, CHAI Xijuan, LIANG Yanjun, Study on surface modification of low density polyethylene (LDPE) film by low temperature plasma treatment, Chinese Journal of Materials Research, **24**(6), 661(2010)
(解林坤, 叶 喜, 吴章康, 邓启平, 柴希娟, 梁艳君, 低温等离子体对低密度聚乙烯(LDPE)薄膜表面改性的研究, 材料研究学报, **24**(6), 661(2010))
9 SU Fenghua, ZHANG Zhaozhu, WANG Kun, JIANG Wei, LIU Weimin, Tribological properties of carbon fabric composite treated with plasma, Chinese Journal of Materials Research, **19**(4), 437 (2005)
(苏峰华, 张招柱, 王 坤, 姜 葳, 刘维民, 等离子处理碳纤维织物复合材料的摩擦学性能, 材料研究学报, **19**(4), 437(2005))
10 N. De Geyter, R. Morent, C. Leys, Surface modification of a polyester non-woven with a dielectric barrier discharge in air at medium pressure, Surface and Coatings Technology, **201**, 2460(2006)
11 S. J. Park, H. J. Sohn, S. K. Hong, G. S. Shin, Influence of atmospheric fluorine plasma treatment on thermal and dielectric properties of polyimide film, Journal of Colloid and Interface Science, **332**, 246(2009)
12 XU Xincan, ZHANG Shunhua, Study on the strength and dyeing properties of UHMWPE fibers by ADBD plasma treatment, Acta Polymerica Sinica, **12**, 1520(2013)
(徐鑫灿, 张顺花, ADBD等离子体处理UHMWPE纤维的强度及染色性能研究, 高分子学报, **12**, 1520(2013))
13 N. Dumitrascu, C. Borcia, Adhesion properties of polyamide-6 fibres treated by dielectric barrier discharge, Surface and Coatings Technology, **201**, 1117(2006)
14 G. Borcia, C. A. Anderson, N. M. D. Brown, Using a nitrogen dielectric barrier discharge for surface treatment, Plasma Sources Science and Technology, **14**, 259(2005)
15 K. L. Wang, W. C. Wang, D. Z. Yang, Y. Huo, D. Z.Wang, Surface modification of polypropylene non-woven fabric using atmospheric nitrogen dielectric barrier discharge plasma, Applied Surface Science, **256**, 6859(2010)
16 M. Xi, Y. L. Li, S. Y. Shang, D. H. Li, Y. X. Yin, X. Y. Dai, Surface modification of aramid fiber by air DBD plasma at atmospheric pressure with continuous on-line processing, Surface and Coatings Technology, **202**, 6029(2008)
17 CHEN Ping, LU Chun, WANG Jing, ZHANG Chengshuang, YU Qi, Interfacial studies of continuous fibers reinforced poly(aromatic ethers) containing phthalazinone moieties, Acta Polymerica Sinica, **1**, 38(2011)
(陈 平, 陆 春, 王 静, 张承双, 于 祺, 连续纤维增强含二氮杂萘酮联苯结构聚芳醚砜酮树脂基复合材料的界面, 高分子学报, **1**, 38(2011))
18 Q. Wang, P. Chen, C. X. JIa, M. X. Chen, B. Li, Improvement of PBO fiber surface and PBO/PPESK composite interface properties with air DBD plasma treatment, Surface and Interface Analysis, **44**, 548(2012)
19 C. X. Jia, P. Chen, Q. Wang, B. Li, M. X. Chen, Surface wettability of atmospheric dielectric barrier discharge processed Armos fibers, Applied Surface Science, **258**, 388(2011)
20 C. X. Jia, P. Chen, W. Liu, B. Li, Q. Wang, Surface treatment of aramid fiber by air dielectric barrier discharge plasma at atmospheric pressure, Applied Surface Science, **257**, 4165(2011)
21 HU Fuzeng, *Surface and Interface of Materials* (Shanghai, East China University of Science and Technology Press, 2008) p.102
(胡福增, *材料表面与界面* (上海, 华东理工大学出版社, 2008) p.102)
22 PEI Jinchang, Physicochemical properties of Plasma and its application(III), Printing and Dyeing, **13**, 41(2005)
(裴晋昌, 低温等离子体物理化学基础及其应用(三), 印染, **13**, 41 (2005))
23 HU Jianhang, FANG Zhi, ZHANG Cheng, ZHAO Longzhang, Research progress in surface modification of materials using dielectric barrirer discharge, Materials Review, **21**(9), 71(2007)
(胡建杭, 方 志, 章 程, 赵龙章, 介质阻挡放电材料表面改性研究进展, 材料导报, **21**(9), 71(2007))
24 D. Liu, P. Chen, J.J. Mu, Q. Yu, C. Lu, Improvement and mechanism of interfacial adhesion in PBO fiber/bismaleimide composite by oxygen plasma treatment, Applied Surface Science, **257**, 6935 (2011)
25 W. G. Pitt, J. E. Lakenan, A. B. Strong, The influence of plasma gas species on the adhesion of thermoplastic to organic fibers, Journal of Applied Polymer Science, **48**, 845(2003)
26 A. T. DiBenedetto, S. J. Huang, D. Birch, J. Gomez, W. C. Lee, Reactive coupling of fibers to engineering thermoplastics, Composite Structures, **27**, 73(1994)
27 U. Kogelschatz, Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, industrial applications, Plasma Chemistry and Plasma Processing, **23**, 1(2003)
28 K. K. Wong, X. M. Tao, C. W. M. Yuen, K. W. Yeung, Low temperature plasma treatment of linen, Textile Research Journal, **69**, 846 (1999)